

## СПОСОБ ИНВЕРСНОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПО ОДНОМЕРНЫМ ПРОЕКЦИЯМ

С. И. Моряков, С. М. Нестеров, И. А. Скородумов

Центральный научно-исследовательский институт ВКС МО России, 141091, Москва

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2020 г.

**Аннотация.** Предложен способ инверсного синтезирования двумерных радиолокационных изображений объектов с использованием томографического приёма интегрирования одномерных проекций. Способ применим для условий лабораторных измерений и позволяет увеличить динамический диапазон двумерных изображений объектов, синтезируемых в широких секторах углов наблюдения, а также снизить потребные для этого вычислительные ресурсы. Приведены сравнительные результаты инверсного синтезирования известным и предложенным способами двумерных круговых радиолокационных изображений металлической сферы.

**Ключевые слова:** эффективная площадь рассеяния, инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения, томография, обратное преобразование Радона.

**Abstract.** Modern wideband radar systems have improved performances for obtaining inverse synthetic aperture radar images of radiating objects. This technics allows obtaining local scattering characteristics in anechoic chambers and radar test facilities. Typically, an image is reconstructed using two-dimensional Fourier transform with first reformatting radar data into rectangular grid in  $k$ -space. We propose a method of inverse synthesis with a high dynamic range, based on tomographic processing of back projections. One-dimensional windowing during the image reconstruction process should be applied to reduce the energy of the side lobes. The results of modeling the scattering signal of a metal sphere are proposed.

**Key words:** radar cross section, inverse synthetic aperture, radar images, tomography, inverse radon transform.

В связи с активным развитием широкополосной радиолокационной техники всё большую актуальность получают направления исследований, связанные с формированием радиолокационных изображений (РЛИ) наблюдаемых объектов [1, 2]. В частности, радиолокационные системы с режимами инверсного синтезирования двумерных радиолокационных изображений объектов используются на открытых измерительных полигонах и в безэховых камерах для оценки локальных радиолокационных характеристик, повышения точности измерений и решения ряда прикладных задач [2, 3].

Известен и успешно применяется на практике [2-4] способ формирования двумерных РЛИ на основе обратного преобразования Фурье отраженного сигнала, зарегистрированного в полярных координатах «частота-угол» и интерполированного в прямоугольные координаты «пространственных частот», билинейно связанных с декартовыми. Способ обеспечивает улучшение разрешения формируемых двумерных РЛИ при увеличении сектора углов синтезирования – до примерно 0,2 средней длины волны по обеим декартовым координатам при синтезировании сигнала в секторе до 360° [2, с.214]. Используемый в способе математический аппарат представляет собой приводимые ниже оператор свёртки отражённого от объекта сигнала (1) и проиллюстрированные на рис.1 области его определения и интегрирования.

$$S(x, z) = \frac{1}{\Delta f_z \Delta f_x} \int_{\min f_z}^{\max f_z} \int_{\min f_x}^{\max f_x} s(f_x, f_z) e^{j2\pi(f_z z + f_x x)} df_x df_z. \quad (1)$$

где

$S(x, z)$  – отклик точки на плоскости локации в декартовых координатах, отсчитываемых от оси вращения,

$z$  – координата дальности,  $x$  – поперечная координата,

$$s(f_x, f_z) = \begin{cases} s(f, \psi), & \text{если } [f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \wedge |\psi| \leq \Delta\psi] \\ 0, & \text{если } [f < f_{\min} \vee f > f_{\max} \vee |\psi| > \Delta\psi] \end{cases},$$

$f$  – частота зондирования в полосе перестройки от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ ,

$\psi$  – угол локации, изменяющийся в секторе  $\pm \Delta\psi$  относительно ракурса формируемого изображения,

$$f_z = \frac{2f}{c} \cos\psi \text{ и } f_x = \frac{2f}{c} \sin\psi \text{ – «пространственные частоты»,}$$

$c$  – скорость света,

$s(f, \psi)$  – зарегистрированный отражённый сигнал,

$s(f_x, f_z)$  – сигнал в координатах «пространственных частот»,

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{f_z^2 + f_x^2}, \quad \psi = \arctg \frac{f_x}{f_z}, \quad \Delta f_z = \max f_z - \min f_z, \quad \Delta f_x = \max f_x - \min f_x,$$

$\min f_x, \max f_x, \min f_z, \max f_z$  – границы области «пространственных частот», которые при  $\Delta\psi \leq \pi/2$  равны:

$$\min f_z = \frac{2f_{\min}}{c} \cos \Delta\psi, \quad \max f_z = \frac{2f_{\max}}{c},$$

$$\min f_x = -\frac{2f_{\max}}{c} \sin \Delta\psi, \quad \max f_x = \frac{2f_{\max}}{c} \sin \Delta\psi,$$

при  $\Delta\psi > \pi/2$  –

$$\min f_z = \frac{2f_{\max}}{c} \cos \Delta\psi, \quad \max f_z = \frac{2f_{\max}}{c},$$

$$\min f_x = -\frac{2f_{\max}}{c}, \quad \max f_x = \frac{2f_{\max}}{c}.$$

Дискретизация оператора свёртки зависит от вида зондирующего сигнала.

Для когерентного импульсного периодического сигнала со ступенчатой перестройкой частоты она приведена в [2, с.211].

Недостатком данного способа является неэффективность использования весовых окон для подавления паразитных цифровых боковых откликов при синтезировании РЛИ объектов в широких секторах углов наблюдения, что

приводит к зашумлению изображений и невозможности выделения центров рассеяния, интенсивность которых меньше доминирующих на порядок и более. То есть при синтезировании РЛИ в широких секторах углов имеет место фактическое снижение динамического диапазона формируемых изображений с ухудшением их качества. Кроме того, с уменьшением длины волны зондирующего сигнала, равно как и с увеличением размера кадра РЛИ, для обеспечения однозначности по азимуту необходимо снижать скорость вращения исследуемого объекта и учащать сетку «пространственных частот», в результате чего процедура интерполяции сигнала в эту сетку требует больших вычислительных затрат. Указанные недостатки увеличивают время проведения исследований и затрудняют анализ получаемых результатов.

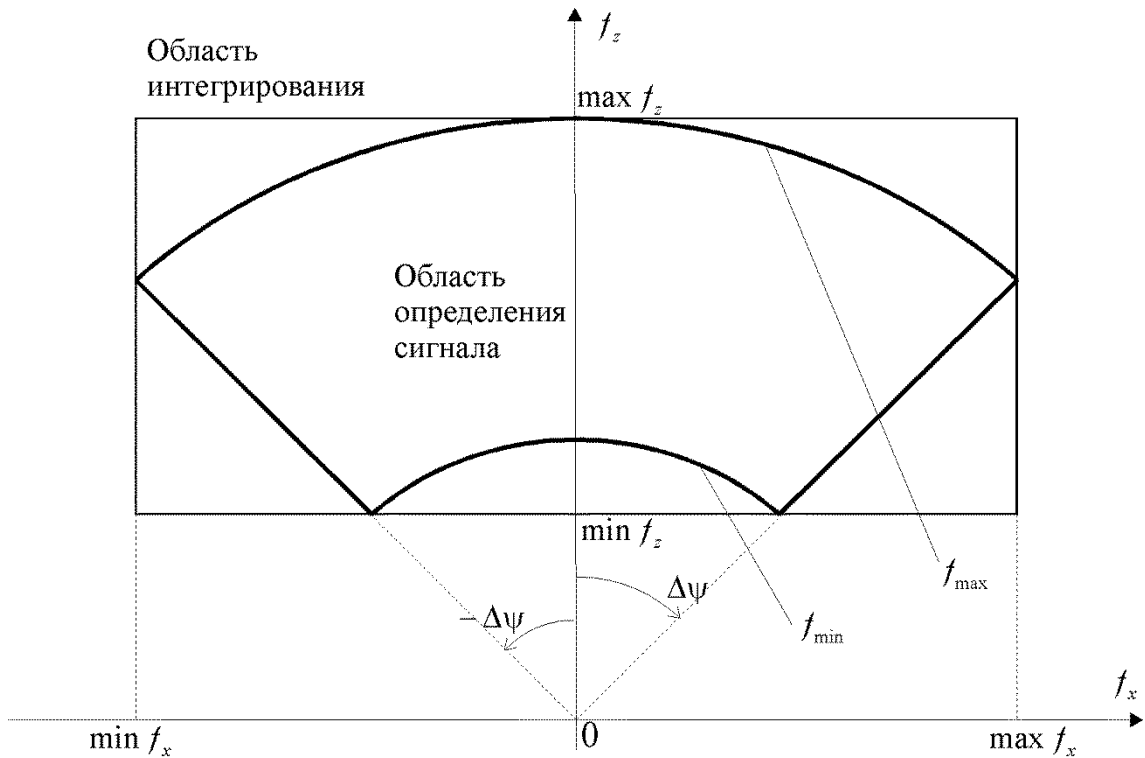


Рис. 1. Области определения (круговой сектор) и интегрирования (прямоугольник) отражённого сигнала

Цель данной работы – обеспечить возможность повышения динамического диапазона инверсно-синтезируемых двумерных РЛИ объектов в широких угловых секторах и снизить потребные для этого вычислительные ресурсы.

В качестве альтернативы синтезированию РЛИ с помощью двумерного преобразования Фурье сигнала, взятого в координатах «пространственных частот», предлагается использовать томографический приём формирования изображений на основе фильтрованных обратных проекций, заключающийся в отображении на плоскость локации одномерных проекций исследуемого объекта, аналогично обратному преобразованию Радона [5]. Данный приём должен быть адаптирован для обработки радиолокационных данных.

Задача работы состояла в разработке способа формирования инверсно-синтезируемых двумерных РЛИ в широких угловых секторах на основе отображения одномерных профилей дальности, полученных под различными углами, на плоскость локации.

Для решения задачи необходимо:

сформировать синограмму объекта – набор его одномерных РЛИ по дальности (профилей дальности), привязанных к углам локации с равным шагом, значение которого зависит от требуемого отношения сигнал-шум элемента разрешения изображения [6];

провести весовую обработку отражённого сигнала, получая профили дальности с подавленными цифровыми боковыми откликами за счёт незначительного расширения главных лепестков откликов;

воспользоваться томографическим приёмом восстановления двумерных изображений из их проекций, а именно: проинтегрировать по всем профилям дальности, полученным под различными углами, отклики следов каждой точки задаваемой двумерной сетки формируемого изображения.

Пусть наблюдаемый объект облучается когерентным импульсным периодическим сигналом со ступенчатой перестройкой частоты, а комплексная огибающая отраженного от объекта сигнала регистрируется в виде  $s(n, m)$ , где  $m$  – номер пачки импульсов из  $M$  принятых пачек за полное время наблюдения,  $n$  – номер частоты зондирования из  $N$  частот в каждой пачке.

Не учитывая период излучения импульсов сравнительно с медленно меняющимся углом наблюдения, привяжем все импульсы пачки

к фиксированному моменту времени или углу локации (соответствующему среднему импульсу пачки). Тогда обратное преобразование Фурье отраженных от объекта сигналов для всех импульсов пачки даст профиль дальности объекта, привязанный к тому же моменту времени (углу локации), к которому была привязана пачка импульсов.

Тем самым, в терминах томографии, имеем привязанные к углам наблюдения  $\psi_m$  сигналы  $S_{\psi_m}(t)$  и их спектры  $s_{\psi_m}(f)$ , которые связаны между собой преобразованием (2).

$$S_{\psi_m}(t) = \frac{1}{(f_{\max} - f_{\min})_x} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} s_{\psi_m}(f) e^{j2\pi f t} df, \quad (2)$$

где  $t$  – время двойного прохождения сигнала от центра вращения до проекции точки с радиусом  $r$  на профиле дальности.

Учитывая  $r = \frac{t c}{2}$ , пересчитываем  $S_{\psi_m}(t)$  в профили дальности  $S_{\psi_m}(r)$ , где

$$r = z \cos \psi_m + x \sin \psi_m \quad (3)$$

проекция точки с координатами  $(x, z)$  на  $m$ -й профиль дальности.

Привязанные к углам отсчёты пачек импульсов в сигнальной области и соответствующих им профилей дальности на плоскости локации проиллюстрированы на рис.2.

Для детализации профилей дальности отражённые сигналы пачек импульсов дополняют нулями. Для подавления на профилях дальности паразитных боковых лепестков откликов используют фильтрацию сигнала весовыми окнами [7].

Наложим на плоскость локации прямоугольную сетку, соотнесённую с направлением локации в средний момент временного интервала синтезирования. Размеры сетки по вертикальной и горизонтальной координатам не должны превышать значений однозначности по дальности [2, с.278]. Шаг сетки выберем, исходя из требуемой детализации изображения.

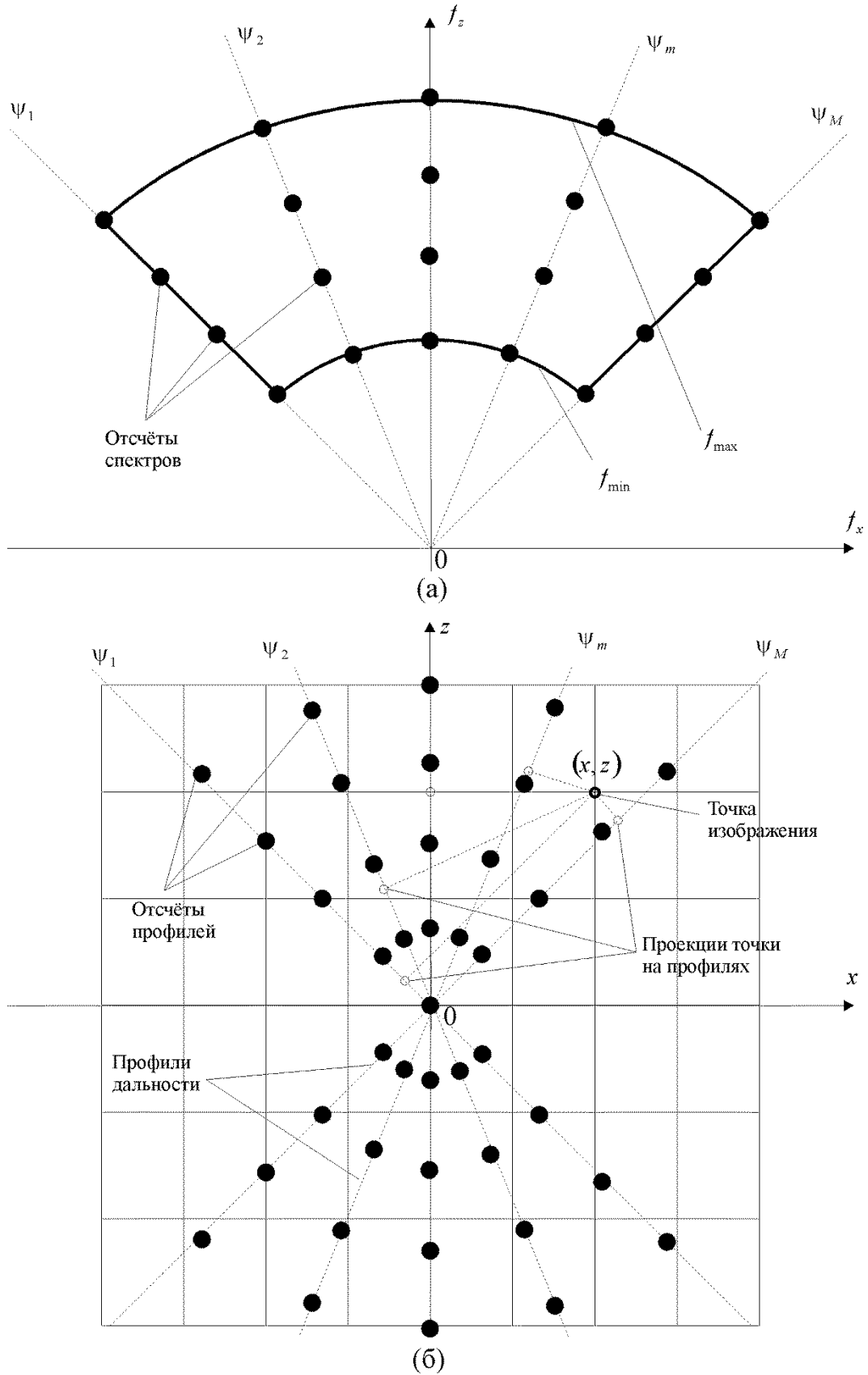


Рис.2. Спектры проекций (а) и проекция изображения (б).

Рассмотрим произвольную точку этой сетки  $(x, z)$  и найдём местоположение её проекций на всех профилях дальности согласно (3). Изменение этого местоположения от угла локации иллюстрирует след точки на синопамме (рис.3).

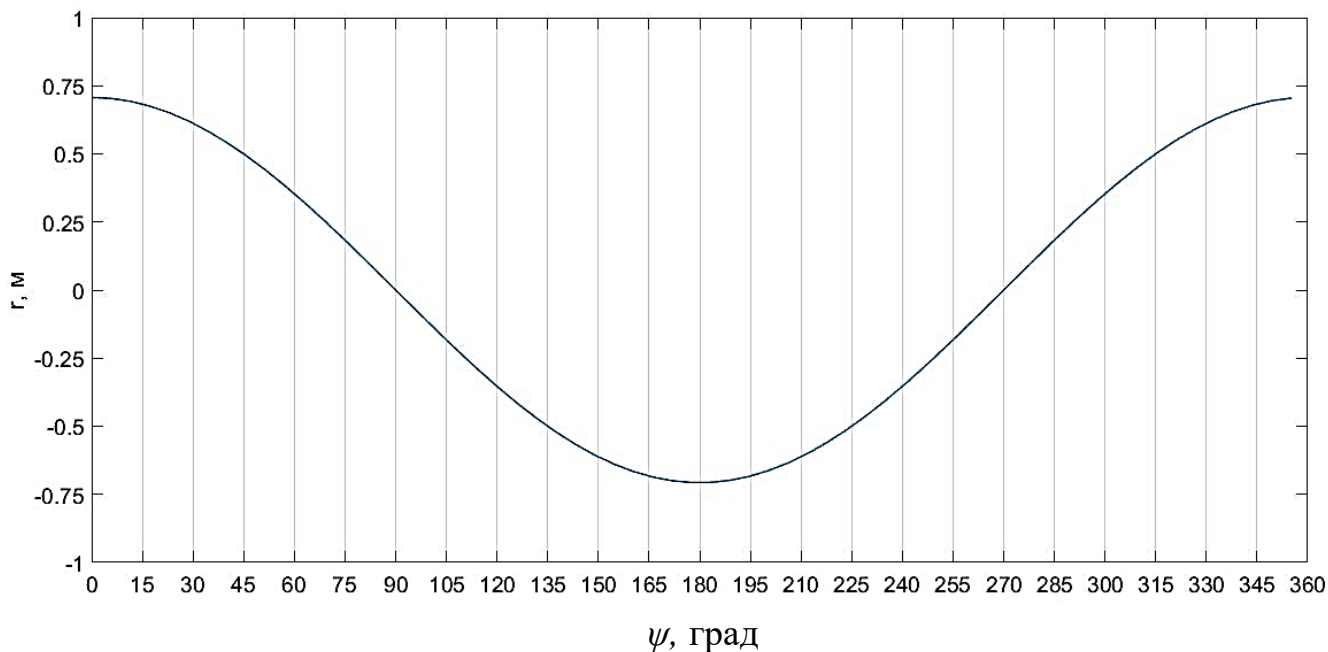


Рис. 3. Типовой след точки.

Интегральный отклик  $S(x, z)$  в точке находим, суммируя в комплексной форме отклики  $S_{\psi_m}(z \cos \psi_m + x \sin \psi_m)$  по следу точки на всех профилях дальности (значения этих откликов получим путём интерполяции между откликами отсчётов, соседних с проекцией точки) и нормируя полученную сумму к числу проекций:

$$S(x, z) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M S_{\psi_m}(z \cos \psi_m + x \sin \psi_m). \quad (4)$$

Отметим, что на погрешность результата кроме ошибок интерполяции влияют точность угловой привязки профилей дальности и определения на них координаты оси вращения.

Повторяя процедуру интегрирования для всех точек сетки, получим искомое двумерное РЛИ объекта. Заметим, что интегрирование отклика для каждой точки изображения может выполняться независимо, то есть алгоритм легко распараллелить для повышения скорости вычислений.



Необходимо отметить, что хотя из (4) следует формальная возможность формирования кругового изображения по сигналу, синтезированному в половине круга, радиолокационные отклики другой половины на таком изображении могут быть не отображены вследствие их экранировки.

Проверка работоспособности предложенного способа инверсного синтезирования двумерных РЛИ объектов выполнена для металлической сферы радиусом 20 см. Строгим решением (методом собственных функций) был рассчитан отражённый от сферы сигнал в полосе частот 7...13 ГГц, по которому синтезировались её двумерные круговые (в угловом секторе 0...360°) РЛИ на основе известного способа свертки сигнала по «пространственным частотам» и предложенного способа формирования РЛИ по проекциям.

При синтезировании РЛИ сферы по «пространственным частотам» отраженный от сферы сигнал, записанный в полярных координатах «частота-угол», интерполировался в точки прямоугольной сетки пространственных частот, шаги которой определялись согласно [2], исходя из задаваемых размеров кадра.

При синтезировании РЛИ сферы по проекциям каждая частотная пачка импульсов отражённого сигнала добавлялась нулями и при помощи обратного преобразования Фурье преобразовывалась в профили дальности высокого разрешения, после чего путём интегрирования по всем профилям дальности в угловом секторе синтезирования 0...360° формировалась матрица двумерного РЛИ тех же размеров, как для известного способа.

Полученные двумя способами круговые РЛИ сферы без и с использованием весовой фильтрации сигнала весовым окном Кайзера с коэффициентом 9 сопоставлены на рис.4 и рис.5 соответственно. Интенсивность откликов по мощности отражена на рисунках палитрой от синего цвета (минимум) до красного (максимум).

Сравнительный анализ изображений на рис.4 показывает практическую идентичность круговых РЛИ сферы без весовой фильтрации, синтезированных

известным (а) и предложенным (б) способами. При этом изображение, полученное предложенным способом, даже лучше сфокусировано.

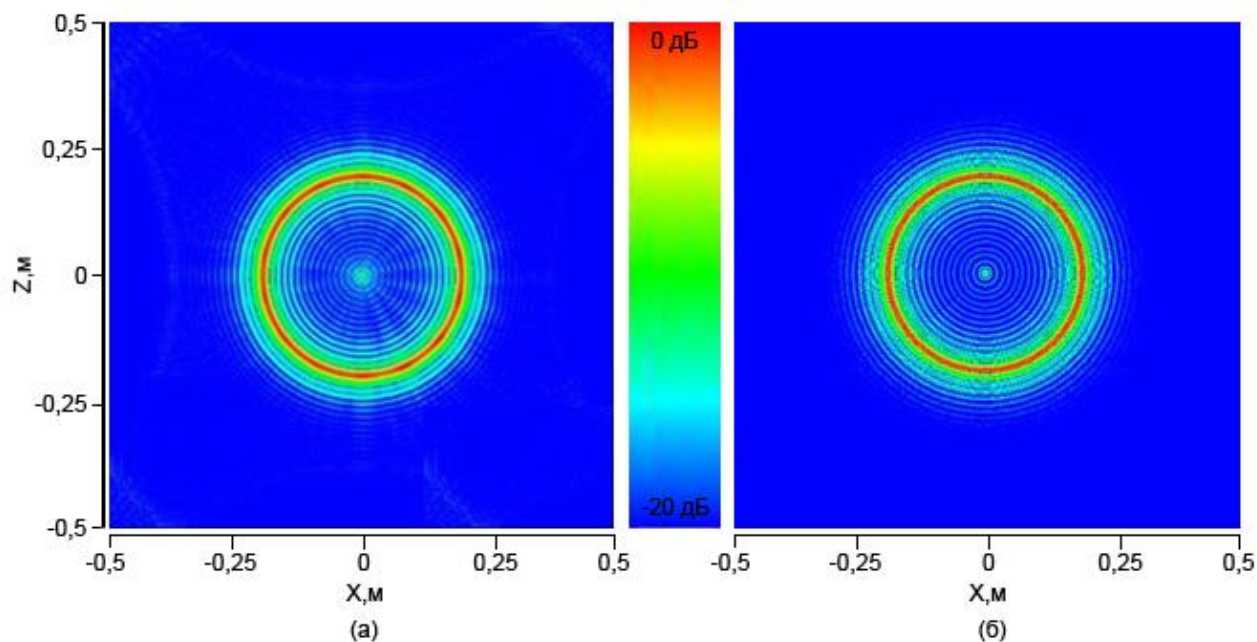


Рис. 4. Круговые РЛИ сферы без весовой обработки, синтезированные известным (а) и предложенным (б) способами.

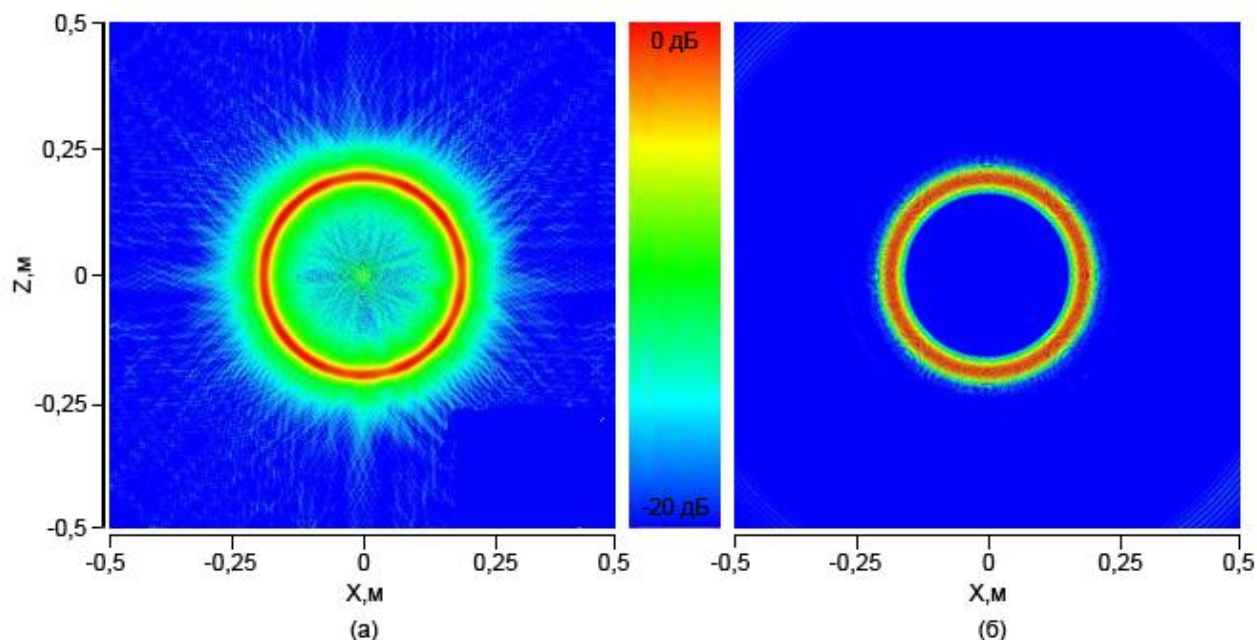


Рис. 5. Круговые РЛИ сферы с весовой обработкой, синтезированные известным (а) и предложенным (б) способами.

Сравнительный анализ изображений на рис.5 показывает, что применение весового окна в известном способе (а) приводит к повышению уровня фона

РЛИ и искажениям геометрии объекта вследствие неработоспособности фильтра в направлениях, отличных от ортогональных. В то же время, весовая фильтрация в предложенном способе (б) позволила, за счет исключения цифровых боковиков в проекциях (на профилях дальности), повысить динамический диапазон синтезированного РЛИ на 20 дБ

Таким образом, предложенный способ позволяет использовать весовую фильтрацию отраженного сигнала и повысить динамический диапазон инверсно-синтезируемых двумерных РЛИ объектов, формируемых в широких секторах углов наблюдения. Кроме того, способ не накладывает дополнительных условий на скорость вращения объекта для обеспечения однозначности по азимуту, ограничений на шаг по углу между проекциями и обеспечивает возможность распараллеливания расчётов. Тем самым снижаются требуемые вычислительные ресурсы на синтезирование РЛИ объектов в широких угловых секторах, что особенно важно при исследовании объектов больших геометрических размеров. Способ также можно использовать для формирования высоко детализированных РЛИ отдельных участков поверхности объекта.

Вместе с тем, необходимо отметить чувствительность синтезирования РЛИ объектов предложенным способом к точности определения углов локации и координаты оси вращения объекта на профилях дальности, что ограничивает его применение на практике условиями лабораторных измерений. Кроме того, при больших значениях количества импульсов в пачке, периоде их излучения и скорости вращения объекта угол локации за длительность пачки импульсов может измениться столь значительно, что потребуются приводить все импульсы пачки к единому углу за счёт соответствующих фазовых поправок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026 А).

## Литература

1. Chen V.C., Martorella M. Inverse synthetic aperture radar imaging. Principles, Algorithms and Applications // Edison, NJ: SciTech publishing. 2014.
2. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М.Нестерова – М.: Радиотехника, 2015.
3. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скоков П.Н., Скородумов И.А. Способ корректировки диаграмм обратного рассеяния радиолокационного объекта при исключении или снижении уровня отражений от элементов его конструкции // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №.6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.7>
4. Грибков А.С., Грибков В.С., Нестеров С.М. Способ получения двумерного радиолокационного изображения объекта при многочастотном импульсном зондировании и инверсном синтезе апертуры с определением третьей координаты элементов формируемого изображения / Патент RU 2723706 С1, кл. G01S 13/89. (2006.01).
5. Kupce E., Freeman R. The Radon transform: A new scheme for fast multidimensional NMR // Concepts in Magnetic Resonance. 2004. Vol.22A. No.1. P.4-11.
6. Mensa D.L. High Resolution Radar Cross-Section Imaging. // Boston-London: Artech House. 1991. P.206.
7. Hamming R.W. Digital filters. // NJ: Prentice-hall. 1977.

### Для цитирования:

Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Способ инверсного синтезирования двумерных радиолокационных изображений объектов с использованием интегрирования по одномерным проекциям. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.15>